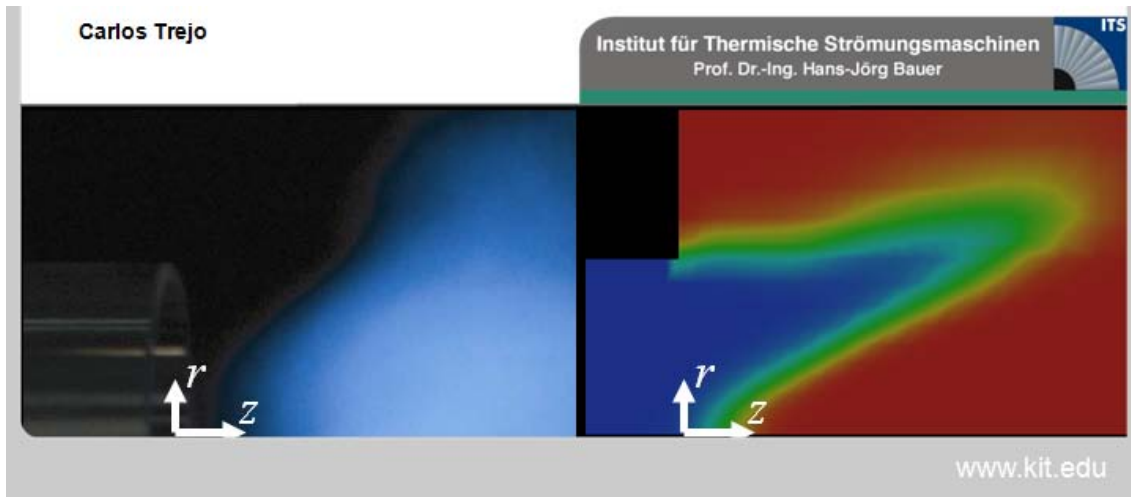
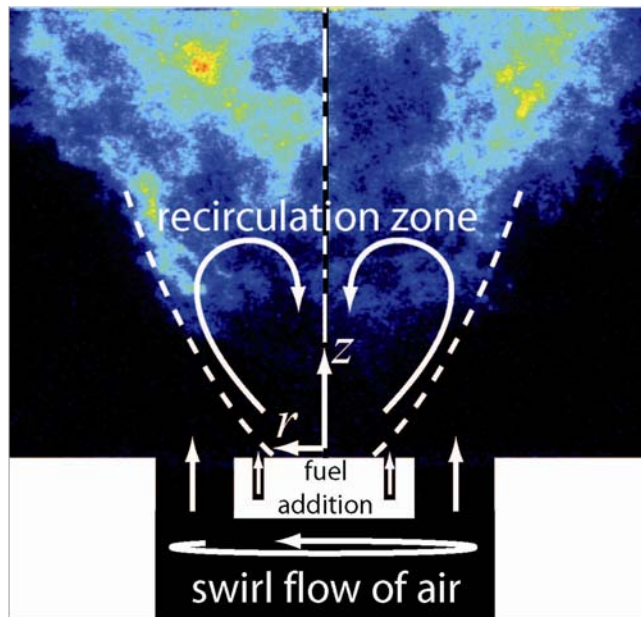


# Simulación de la Influencia Aerodinámica de Combustión en Flujos Rotacionales.



# 1 La influencia aerodinámica de la combustión. Qué se quiso aprender acerca de ella y por qué.



Llama no premezclada con flujo rotacional, estabilizada con un cuerpo central [Keck and Aigner 2001]

Figura 1

La rotación con la cual entra el flujo a la entrada de esta llama origina las zonas de recirculación que pueden verse en la Figura , donde se puede observar, que la posición de la llama y la zona de recirculación están estrechamente liadas.

Para implementar mejoras a esta llama, es necesario entender la interacción entre el flujo y la llama. Esta interacción está ilustrada en la Figura

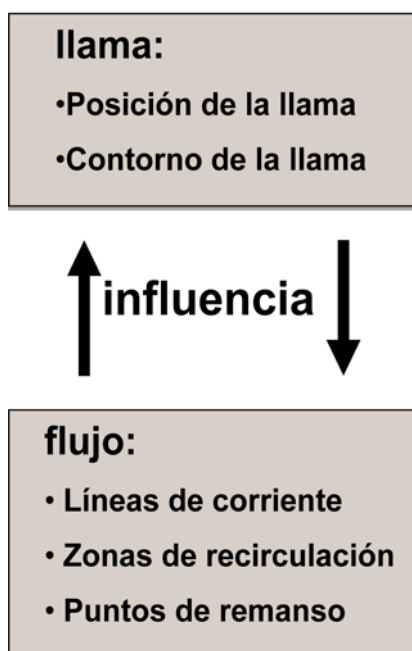


Figura 2

No sólo la llama tiene una influencia sobre el flujo, modificando líneas de corriente, zonas de recirculación, y puntos de remanso. También existe un efecto de realimentación del flujo sobre la llama. Aquí está la complejidad del problema. La llama anteriormente presentada es una llama no premezclada, muy parecida a aquellas que pueden ser observadas en turbinas de gas. Para reducir emisiones, en el futuro las llamas deberían ser premezcladas. En las llamas premezcladas, hay una zona de premezcla en la cual el combustible se mezcla con el oxidante, antes de quemar.

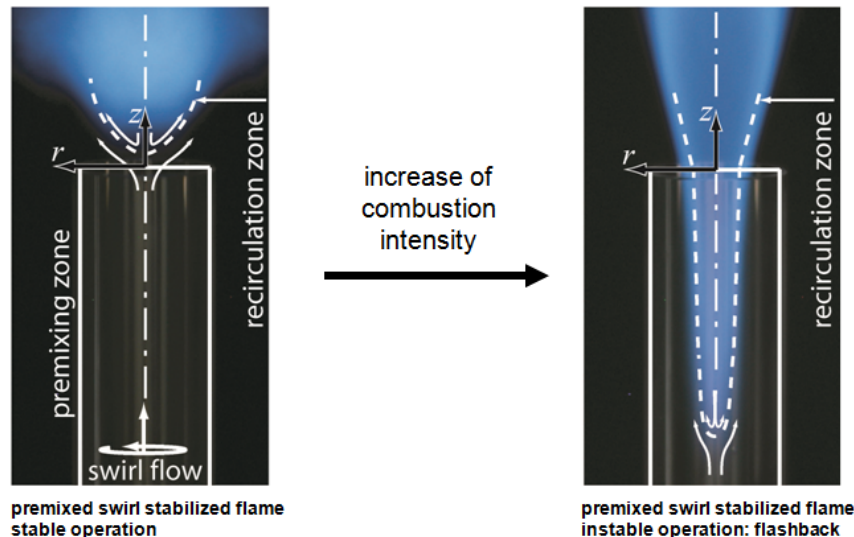


Figura 3

Como se puede apreciar en la Figura , un aumento en la intensidad de la combustión puede llevar a la llama, estabilizada en un momento tras la zona de premezcla, a reubicarse dentro de esta zona, cambiando completamente de estructura. Este fenómeno es conocido como Flashback, y en la práctica, puede ocasionar la destrucción del sistema de combustión. Flashback ha sido lo que nos ha motivado a aprender más sobre la interacción entre la llama y el flujo.

## 2 Estrategia para aprender: un modelo de simulación numérica

Este proyecto cumple la función de reforzar y comprobar ciertas teorías extraídas de un experimento llevado a cabo en el “Institut für thermische Strömungsmaschinen” del “Karlsruhe Institut of Technology”, por el Ing. Georg Blessinger.

El objetivo era de obtener predicciones correctas cualitativamente de la interacción entre el flujo y la llama para diferentes situaciones. Como se verá más tarde, se estuvo caminando sobre terreno desconocido, con lo cual un mecanismo de aprendizaje fue “ensayo y error”. Esto requiere simular una gran cantidad de veces, lo cual sólo es posible si éstas tienen duraciones relativamente cortas. No era necesaria una herramienta especialmente precisa, sino una más bien rápida.

Es por eso que se escogió un modelo en dos dimensiones, RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) y un mallado relativamente grueso.

### Procedimiento:

1. Modelización del flujo sin combustión flujo
2. Modelización del flujo con combustión, con una llama libre flujo ↔ llama
3. Modelización del flujo con combustión, con una llama fija (sin influencia del flujo sobre la llama) flujo ← llama

El primer paso fue la modelización del flujo sin combustión. A continuación, este modelo fue extendido, y en él se introdujo combustión. El problema de este experimento, es que era imposible aislar la influencia de la llama sobre el flujo, ya que el flujo no sólo era modificado por la llama, sino que también tenía una influencia de tipo realimentación sobre la misma. Se decidió romper este bucle de realimentación. Esto fue posible modificando el código del “solver”, de manera que la llama permaneciera fija en el espacio. Tras ser inicializada de acuerdo con nuestras necesidades, esta llama permanecía intacta a lo largo de la simulación, lo que elimina la influencia del flujo en la llama.

## 2.1 Caracterización del flujo

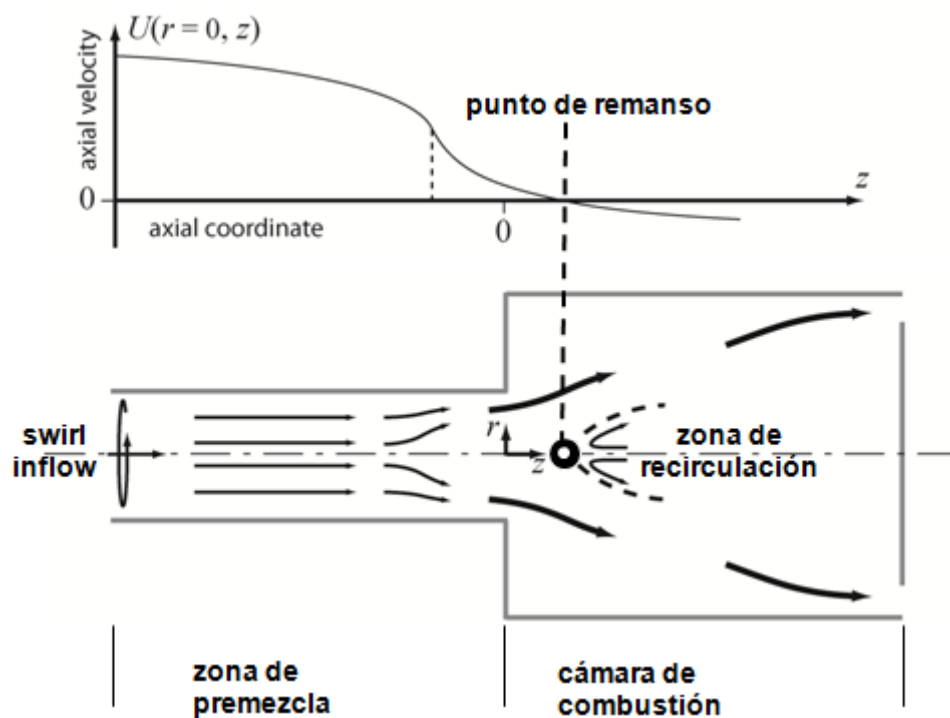


Figura 4

La geometría del problema, bastante simple, consiste de dos cilindros: la zona de premezcla, y la cámara de combustión. El flujo, que entra con una cierta rotación la zona de premezcla, sufre una expansión radial al llegar a la cámara de combustión, creando una zona de recirculación en torno al eje.

En la distribución de velocidades axiales a lo largo del eje, se puede distinguir el punto de remanso, punto para el cual la velocidad axial es nula. Este punto marca el comienzo de la zona de recirculación, y será el parámetro que emplearemos para caracterizar el flujo.

## 2.2 Caracterización de las llamas

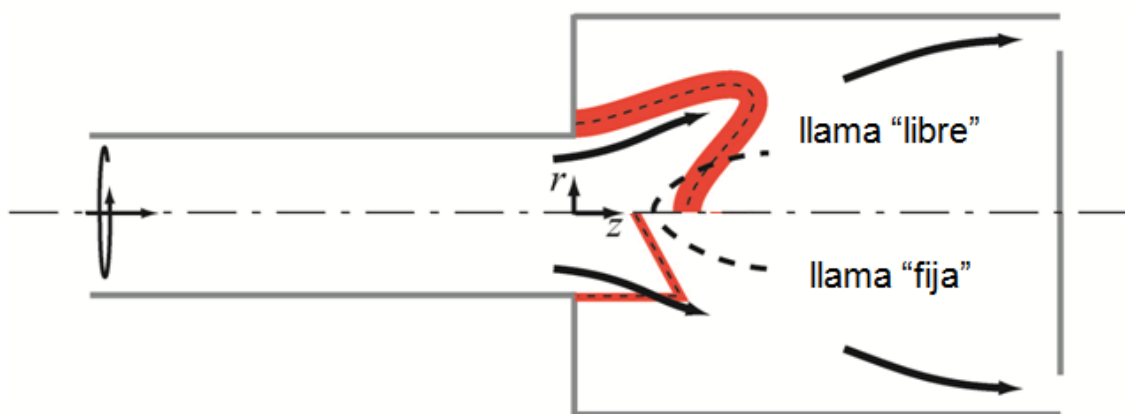


Figura 5

Como fue mencionado anteriormente en este estudio se ha trabajado con dos tipos de llamas: la llama natural, que se adapta al flujo, y la llama fija, sobre la cual ejercemos un control absoluto. En esta llama podemos cambiar ciertos parámetros para estudiar su influencia, como la posición axial, el espesor del frente de llama, y el ángulo que forma éste con el eje.

## 3 Configuración del experimento numérico

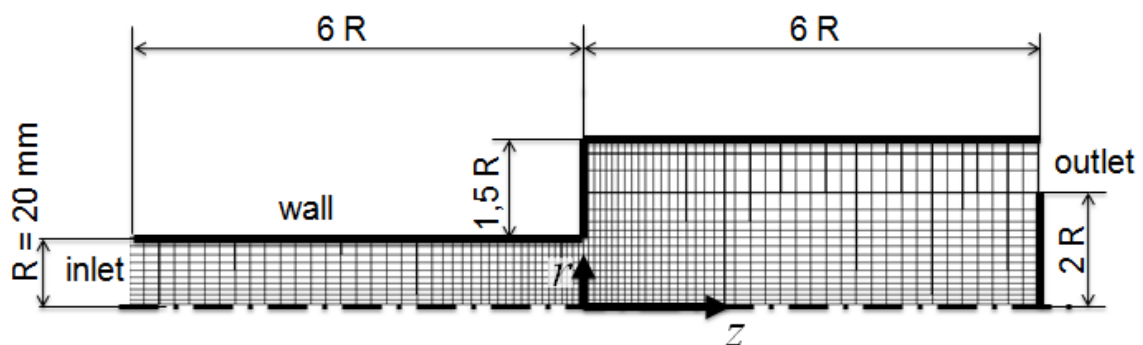


Figura 6

Se escogió hacer una simplificación axisimétrica en 2D de la geometría, y he aquí el mallado. Ciertas zonas, véase el eje o el codo, requerían una mayor precisión de mallado. En estos puntos, el mallado fue refinado consecuentemente. Para mayor estabilidad de la simulación, se escogió una pared a la salida, como es costumbre en este tipo de simulaciones, ya que el flujo inverso que puede ocurrir en estos puntos contribuye negativamente a la estabilidad del problema.

El código CFD (computational fluid dynamics) escogido fue OpenFOAM, un programa en código abierto que como tal, permite modificaciones en el código, lo cual era de crucial importancia. El “solver” ha sido XiFoam a lo largo del estudio, un solver compresible que contempla combustión con ayuda de una “variable de progreso”.

El modelo turbulento escogido fue RAS (Reynolds Averaged Stress), que resuelve las ecuaciones para el flujo medio y hace la estadística de las fluctuaciones. El modelo de combustión empleado fue “Weller Flame Surface Density model”, que tiene en cuenta la mayor superficie de una llama “instantánea” debida al “wrinkling” de la llama o arrugamiento.

Las condiciones de contorno fueron escogidas de la siguiente manera (he aquí las más relevantes):

	Inlet	Walls	Outlet
Velocity	Rankine vortex	Slip	zeroGradient
Pressure	zeroGradient	zeroGradient	102000 Pa
Temperature	300K	zeroGradient	zeroGradient

La velocidad a la entrada consta de dos componentes: componente axial y componente radial, que tiene la forma a lo largo del radio de un vórtice de Rankine.

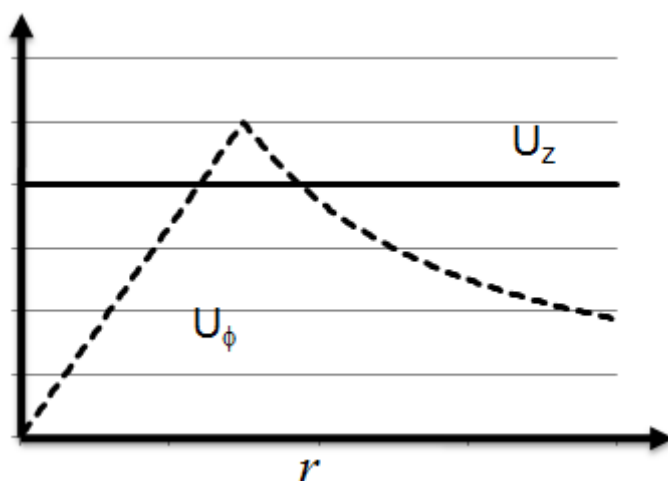


Figura 7

La temperatura fue fijada a la entrada, la presión a la salida.

## 4 Influencia aerodinámica observada

### 4.1 Modelización del flujo sin combustión

El primer paso fue la modelización del flujo sin combustión. En la Figura se puede ver la velocidad axial. La escala ha sido escogido con el objeto de poder apreciar las zonas de recirculación: azul significa velocidades axiales de 0m/s o negativas.

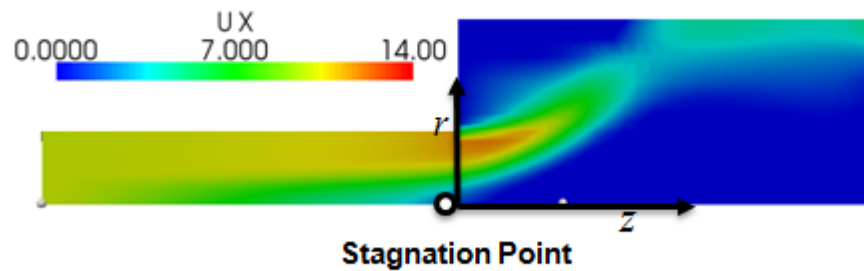


Figura 8

Existen dos zonas de recirculación, una en la esquina, y otra en el eje, que es la que nos interesa. El punto de remanso (Stagnation Point) precede esta zona de recirculación.

El “swirl factor” es un parámetro bastante frecuente en este tipo de experimentos para cuantificar la cantidad de rotación lleva el flujo. Se define como el ratio entre la el flujo de cantidad de movimiento rotacional, y el flujo de cantidad de movimiento axial

—

Este experimento ha sido llevado a cabo para diferentes “swirl factors”, cuyos resultados caracterizados por el punto de remanso se pueden ver en la siguiente gráfica:

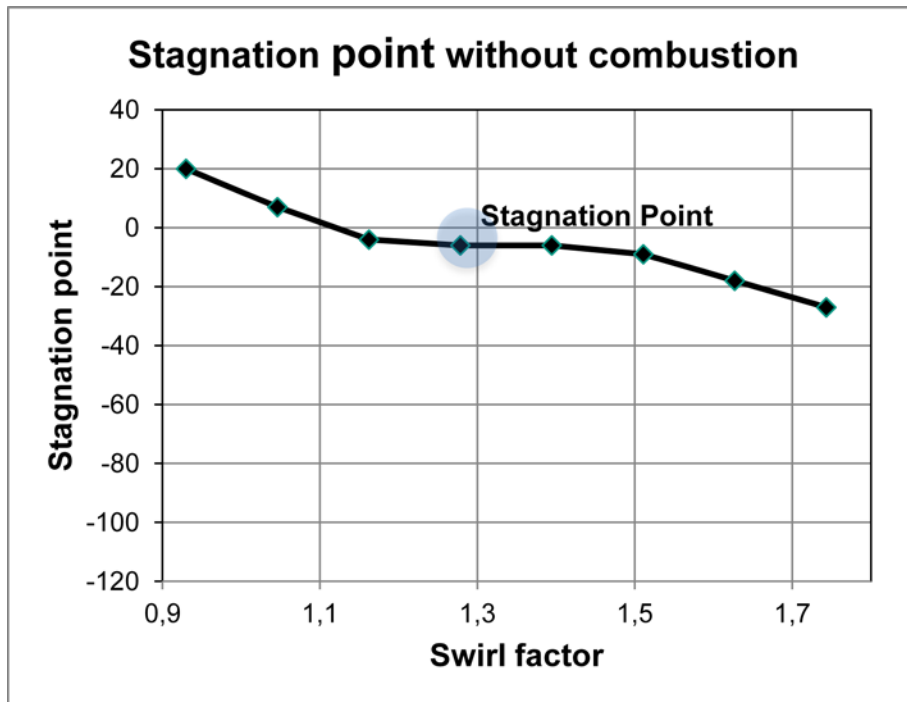


Figura 9

El eje vertical indica la coordenada axial del punto de remanso. Se puede apreciar como una mayor rotación “swirl” del flujo causa una recirculación más intensa, lo cual recoloca el punto de remanso aguas arriba.

## 4.2 Implementación de la combustión

### 4.2.1 El efecto de la llama sobre el flujo

El siguiente paso fue implementar la combustión en el modelo. Con ello, teníamos como objetivo estudiar la influencia de la llama sobre el flujo.

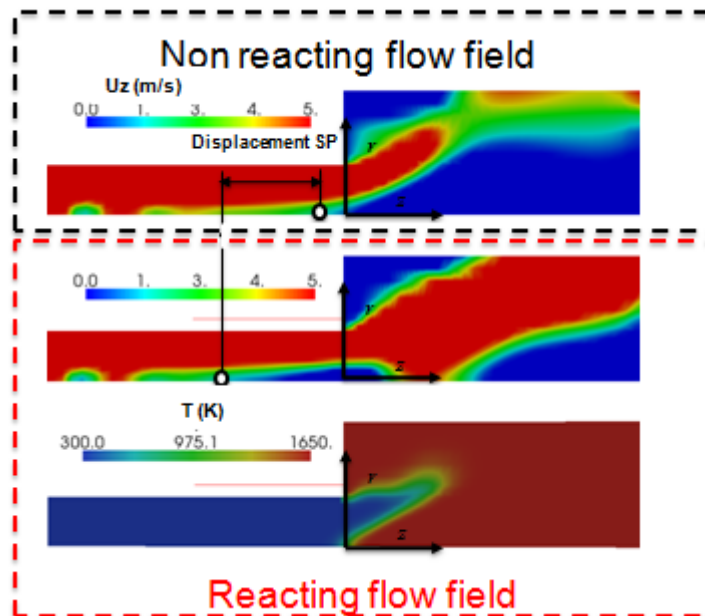


Figura 10



En la Figura se pueden ver las distribuciones de velocidad axial para el sin y con combustión, así como el campo de temperaturas del caso con combustión, que nos da una idea de la posición y forma de la llama. La escala para las velocidades está adaptada para una mejor visualización de las zonas de recirculación. Se puede apreciar que la presencia de la combustión sitúa el punto de remanso aguas arriba, para un mismo “swirl number”.

Para una mejor ilustración de esto, se ha incluido la velocidad axial a lo largo del eje:

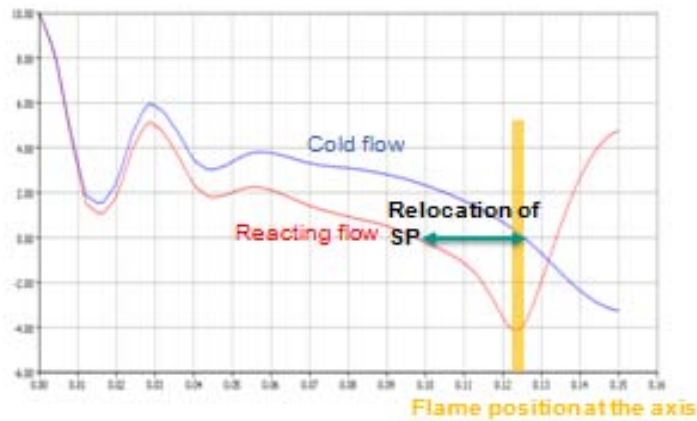


Figura 11

La llama no sólo tiene una influencia aguas abajo, acelerando el flujo, también aguas arriba, frenándolo.

Esta simulación se llevó a cabo para diversos “swirl factors”:

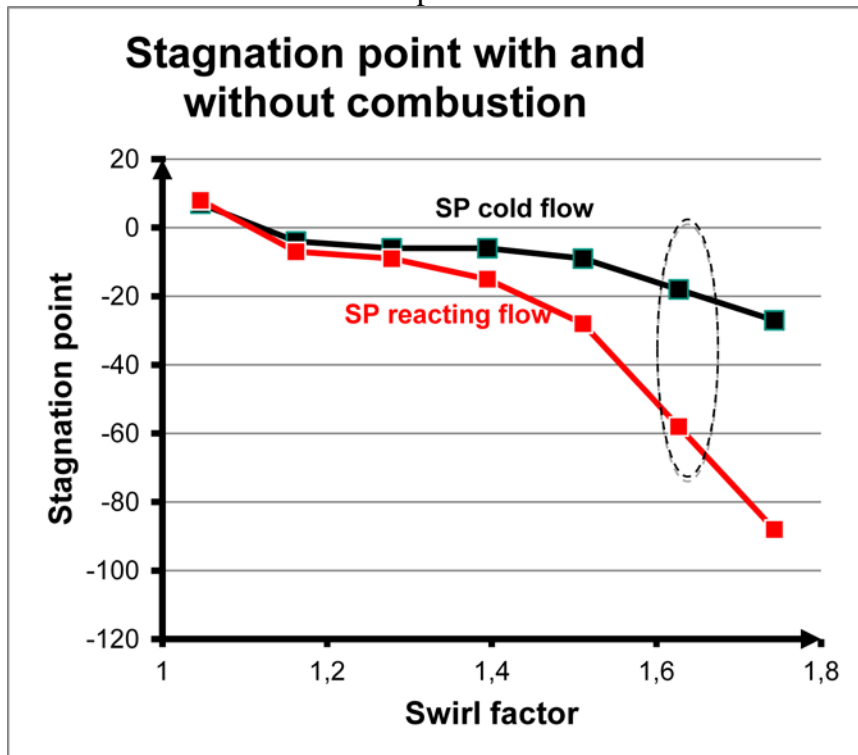


Figura 12

La línea punteada indica la simulación anteriormente presentada. Se puede apreciar que para swirl factors de más de 1,4 la el punto de remanso sufre una importante relocalización.

#### 4.2.2 Efecto realimentación del flujo sobre la llama

En la figura se puede apreciar la influencia del swirl flow, característica intrínseca del flujo, sobre la posición axial del punto de remanso y de la llama

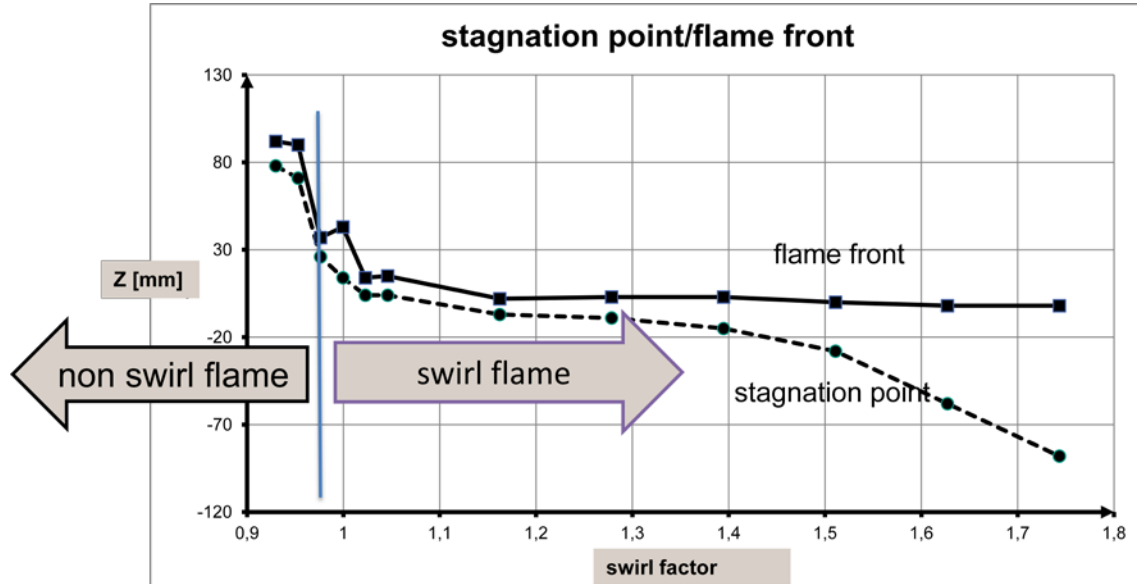


Figura 13

Hay también una influencia sobre la posición de la misma, no sólo esto sino que para swirl factors suficientemente bajos la llama cambia de tipo por completo y deja de ser una “swirl stabilized flame”. Esto se aprecia mejor haciendo un zoom a la izquierda del diagrama, a la zona de transición entre las dos llamas.

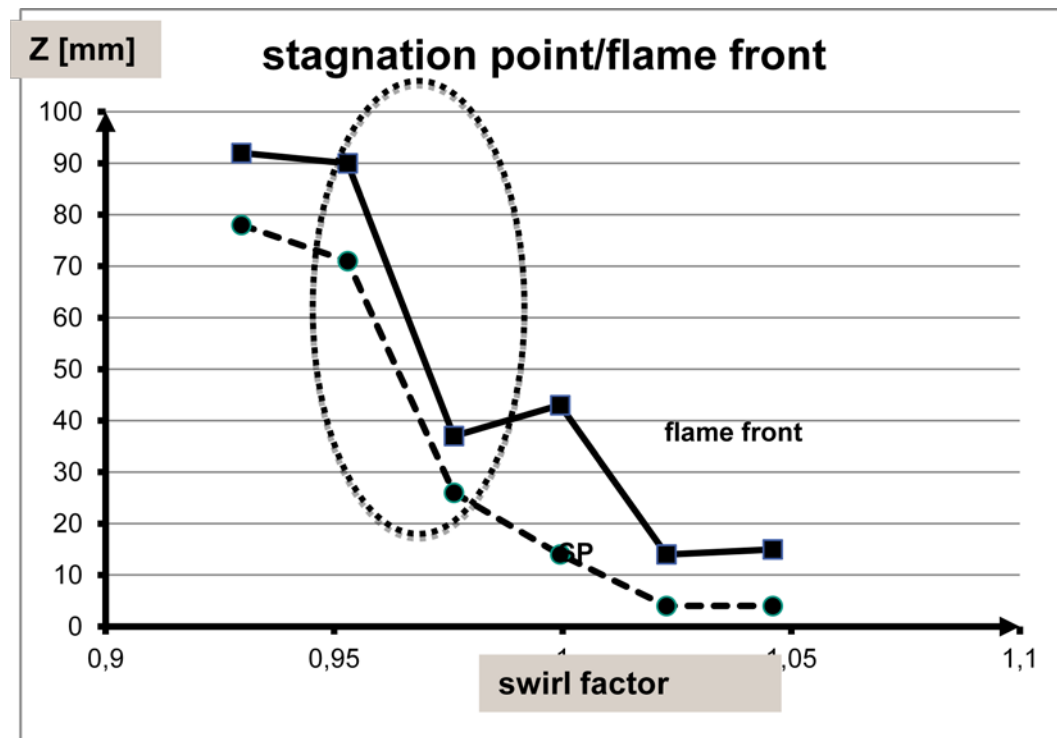


Figura 14

La zona de transición es brusca y tiene lugar en el caso de nuestro experimento para valores de swirl factor de en torno a 0.95.

A continuación se muestran los campos de velocidades axiales y de temperaturas a ambos lados de la transición

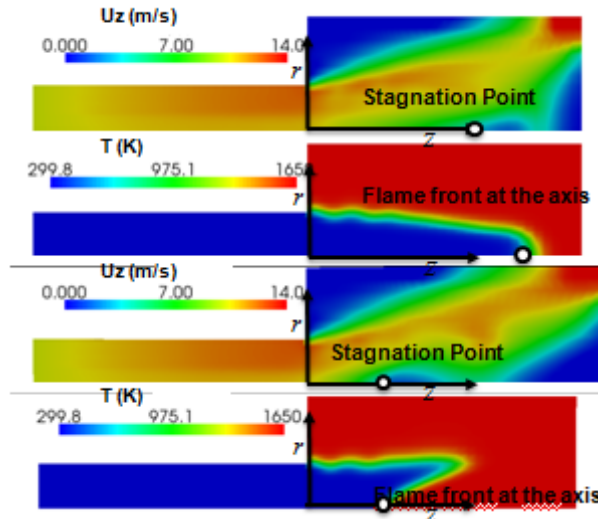


Figura 15

La llama de arriba es de tipo “back step flame”, no estabilizada por la recirculación del eje sino por aquella de la esquina. En la de abajo, una “swirl stabilized flame”, la zona de recirculación del eje también contribuye a estabilizar la llama. Se puede ver que a parte de la diferente posición de la llama, también hay una diferencia en la constitución de la misma, su forma es muy distinta. Esto nos muestra, que el flujo tiene efectivamente una gran influencia en la llama, influencia que vamos a eliminar a través del concepto “llama fija”

### 4.3 La llama fija

#### 4.3.1 Validación del concepto de llama fija

Para poder estudiar la influencia aislada de la llama sobre el flujo hemos creado una “llama fija”. Esta llama está creada utilizando el principio de la “variable de progreso” junto con una inicialización de la temperatura, ambas de forma que no haya discontinuidades, las cuales restan estabilidad al problema.

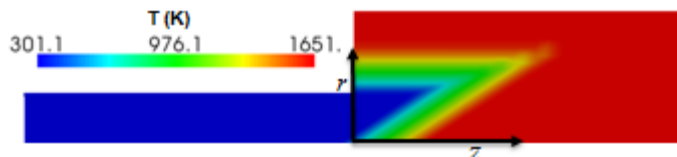


Figura 16

Para poder utilizar este modelo, se verificó que el flujo asociado a una llama fija era muy similar al de una llama libre. Tras un par de cambios en la geometría de la llama fija, esto fue logrado, como se puede ver en la figura

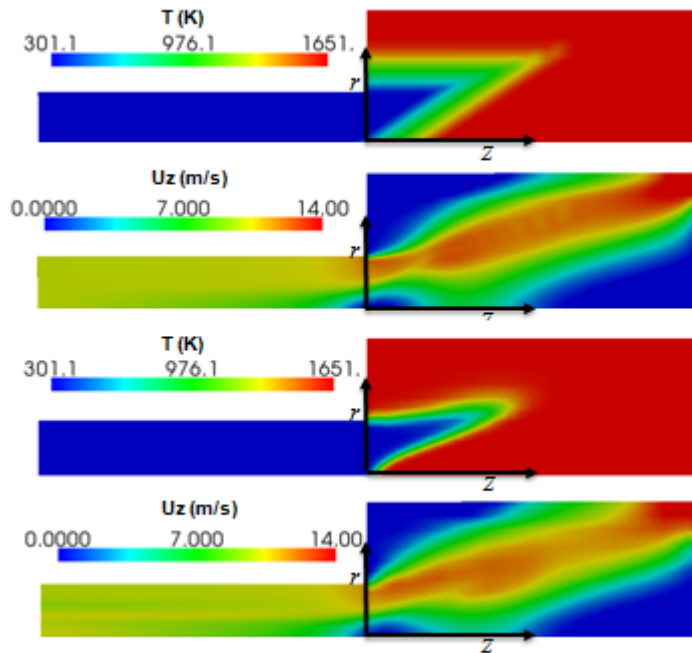


Figura 17

El campo de velocidades en ambos casos es casi idéntico, a pesar de la diferencias en la geometría de la llama.

#### 4.3.2 Modificación de parámetros de la llama fija para el estudio de su influencia sobre el flujo

El paso final fue el estudio de la influencia aislada de modificaciones a la llama, una por una. Se hicieron modificaciones en el espesor de la llama, así como en el ángulo que ésta forma con el eje.

##### 4.3.2.1 Influencia del espesor del frente de llama.

Este estudio se escogió pues llamas en las cuales la velocidad de combustión es mayor tienden a ser más finas.

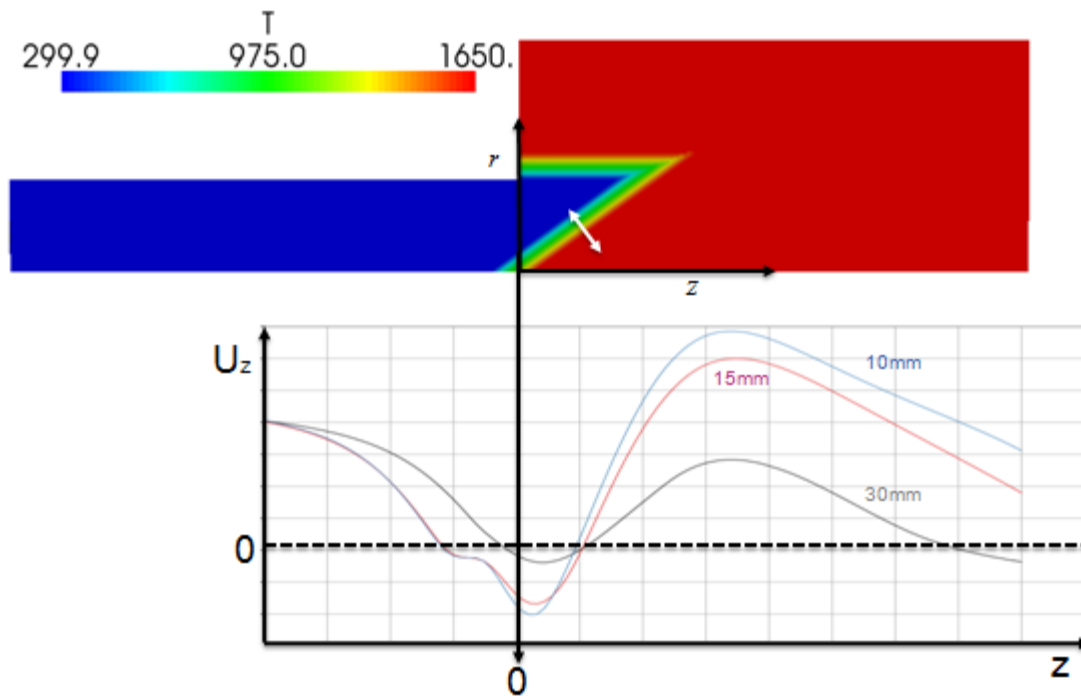


Figura 18

Se puede apreciar como llamas más finas son causantes de deceleraciones (aguas arriba de la llama) y aceleraciones (aguas debajo de la llama) más importantes.

#### 4.3.2.2 Influencia del ángulo del frente de llama con el eje

Este estudio se escogió pues se constató a través de las simulaciones que a partir de un cierto swirl factor, la llama se estabiliza entre la zona de premezcla y la cámara de combustión. Lo que cambia de la llama es el ángulo de ésta, que crece junto con el swirl factor.

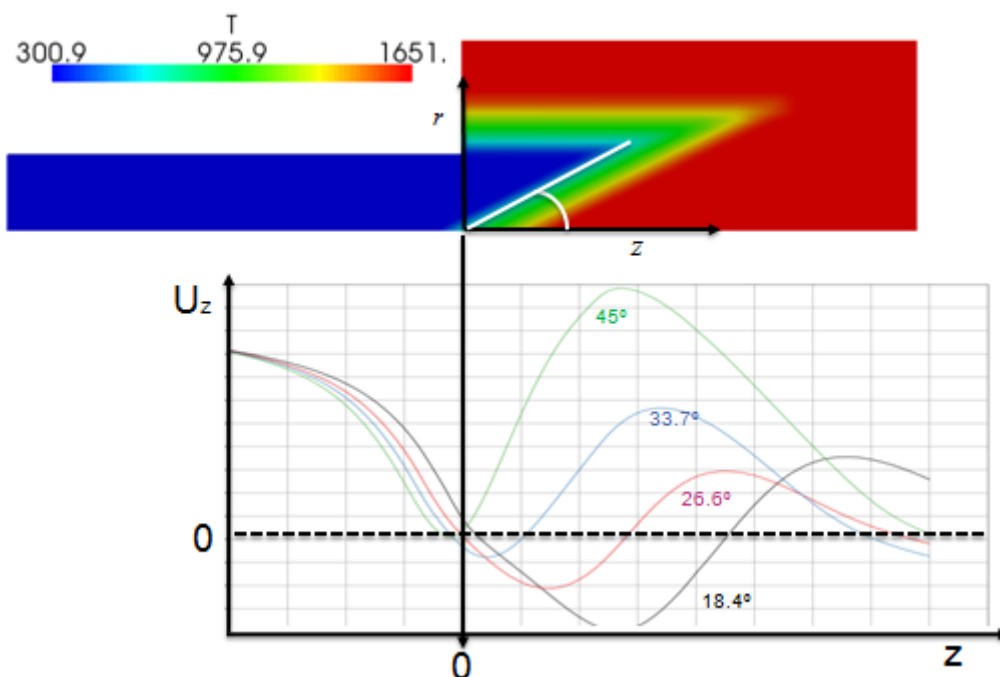


Figura 19

A mayor ángulo de la llama con el eje, más aguas arriba se sitúa la zona de recirculación, a menor ángulo, mayor es la recirculación.

#### ***4.4 Continuación de este trabajo***

Los siguientes pasos a tomar para continuar el estudio serían:

- Estudio de la influencia del modelo de turbulencia y de combustión, así como de sus respectivos parámetros
- Concepción de una simulación 3D con un modelo no estacionario